

都市河川の水利

室 田 明

1. はじめに

文部省の科学研究費補助金のうちで、特に社会的要請の強い研究で格別に推進する必要があるものを「特別研究」と称し、昭和47年度、その制度が発足した当初から「がん」と並んで「自然災害」が採択されて今日に及んでいる。研究期間が長期にわたるために研究体制の硬直化、いわゆるマンネリ化することを防止するため研究組織外部からの check and review を受けるのみならず、内部的にも社会的要請の動向を勘案しつつ、長期研究目標を設定して研究推進の刺激としている。

自然災害特別研究総合班のうちの研究体制委員会がその長期目標について審議を重ねた結果、ほぼ今後10年程度の time-span を想定した場合の課題として「都市災害」が最も適当であるとされた。

このような決定の裏づけの一つに、現今緊急の対応が迫られている東海地震、あるいは関東平野の直下型大地震を想定した都市の耐震対策があるのは申すまでもないが、そうした現実の要請以外に、次のような自然災害科学の側面からみても、都市災害が長期研究目標にふさわしい特徴を備えているからである。

都市域は人口と資産の過度に集中した地域であるから、あらゆる災害に対して莫大な潜在的危険度を包蔵しているという自明の状況のほかに、都市災害が優れて複合的、かつ流動的であるという特性のゆえに、まさに長期研究目標の標的となり得たのであろう。

複合災害とは、異種・複数の災害が同時に、あるいは引き続いて生起するような災害をいう。例えば台風という外力によってほとんど同時に高潮

災害、洪水災害、土砂災害、風害等が生起するし、地震外力によって家屋倒壊→火災→パニックといった sequential な災害の連鎖が発生するだろう。複合災害にあつては、単独の災害に関する研究もさることながら、むしろこうした複数の災害の linkage が重要な研究課題であり、その意味で自然災害研究におけるより高次の研究段階に前進しうるものといえよう。

一方、都市災害が流動的災害であるというゆえんは、災害発生場である都市が、完全に人為の所産であり、それゆえに都市を構成する要素が年々、流動し変動しているのだから、仮に同一規模の災害外力がここに作用しても、被災形態が変遷しているから、同程度の被害が発現することはあり得ない。すなわち、都市災害の他の重要な研究目標は、都市域の変遷を踏まえて、災害発生機構の変化傾向の長期予測とその対策にあるといえる。まさに長期研究目標にふさわしいゆえんである。

当面、都市災害の最たるものは都市震害であろうことに異論はない。しかしながら以下に述べようとする都市河川の水害と、都市の地震災害とは各々固有の災害特性をもつので、防災対策あるいは研究上の力点のおき方におのずから差異があるのは当然である。

一般に通用しているわけではないが、筆者は地震災害や、水害のうちでも大河川の水害等を「重災害」、都市水害に代表されるような災害を「軽災害」とよんでいる。

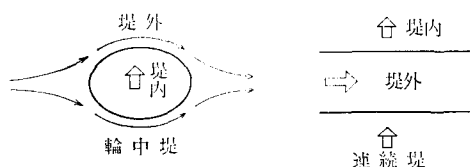
「重災害」の特長は一口でいえば drastic な、人目を引く災害である。災害の発生が突発的、かつ激甚で、被害も集中的・甚大であるが、災害発生の頻度は一般に極めてまれである。

一方、「軽災害」はその一つ一つはニュース報

道の対象にも成り難いありふれた災害で、個々の被害は軽微であるが、その生起頻度は高く、大抵の場合、多数の箇所で開催する。したがって個々の災害の被害額を集計すれば、重災害の被害額に匹敵する額に達することもあり得る。更にこの種の災害で特に留意すべきことは公害の発生機序と全く同様に、加害の進行が緩慢、隠微であるので事態の悪化に気づくのが遅れがちで、対策もしばしば後追的になることである。

都市河川の幹線河道については、一級河川のそれと同程度に洪水災害の安全度も高く設定された治水計画の下に、河道改修も整備されているので、破堤・氾濫といった drastic な災害は極めてまれになったといえるが、一方、流域の都市化等、地文条件の変化によって内水・湛水災害はまだまだ解決されたとは言い難い現状であり、都市化の進展によっては今後むしろ増大する可能性さえある災害である。

第1図のように、原始的な治水工法の一つである輪中堤^{わじゆうてい}では、堤で防御されるべき家屋のある側が堤内であり、洪水の流れている側が堤外であることはいうまでもあるまい。ところが、近代の連続堤になってもこの呼称はそのまま受け継がれて、家屋のある側が堤内、堤防にはさまれた川のある側が堤外とよぶので、常識的には奇異な感じがするだろう。



第1図 輪中堤と連続堤

この呼称に従って、河道を流れる洪水は外水、河道以外の流域に降った雨による貯留水を内水という。すなわち、内水災害とは、このようなたまり水による床下・床上浸水、道路・鉄道等の冠水災害の総称である。

内水災害で人命の失われることはほとんどないし、家屋の倒壊もない。どこからともなく水がひそかに侵入するだけである。倒壊被害に比べ湛水被害は軽微である。ビル地下街の浸水等、特別の場合を除いて報道写真の対象にもならない。しか

しながら、後述するように、計画論レベルでも内水災害の生起頻度は外水災害のそれよりはるかに大きいし、大抵の都市河川流域の地形上の理由から内水・湛水災害の発生箇所は非常に多いのが普通であるが、その位置は不確定的で予測し難い。

このような内水災害による（貨幣換算可能な）総被害額もさることながら、これが都市環境に及ぼす影響、なかんずく、都市機能の阻害について十分注意する必要がある。

初めに述べたように、都市震災のような「重災害」について世論を喚起する必要は申すまでもないが、言葉は「軽災害」であっても、それに対処する地道な努力は怠ってはならないし、知らぬ間に事態が悪化したことにあわせてぬよう日常的な流域住民に対する広報と教育が必要であろう。

Ⅱ. 都市河川の特性

河川に関する最上位の法規である河川法にも都市河川の法的な定義はない。しかし、行政的に都市河川は重要な治水事業の対象となっているので、それなりの定義はある。ここでは常識的に人口稠密な都市域を流れる法河川（一級、及び二級河川）、及びニュータウン等大規模開発地を流れる河川としておこう。

まず、都市河川の流域・河道特性についていえば、そのほとんどが、臨海部の低平な沖積地流域を、緩勾配で複雑な河道網を構成して流下する河川であり、自然河道のみならず、放水路・捷水路・運河・かんがい用水路等、人工水路も河道網システムの重要な要素である。

臨海部にあるため、河道のかかなりの区間が感潮区間であり、更に台風・地震等の異常時には河口から高潮や津波が侵入・遡上するし、強風時には侵入波浪による波浪害も発生するので、こうした臨海部河川の宿命として複合災害を想定せざるを得ず、そのため治水計画を複雑・困難ならしめている。

なお、感潮区間では外海の潮汐振動の遡上・伝播により河道内で水位の振動、往復流の存在といった非定常流特性のみならず、塩淡水共存の場としての密度流の特性も特に水質工学上は重要で、例えば海水塩分のイオン効果によって上流か

ら輸送される微細フロックの沈降が促進されるなど、多くの興味ある課題が集中し、それだからこそこの密度流問題が世界的に水理学のトピックスの一つになっているのであるが、ここでは自然災害について述べるので水質関連の問題は割愛する。

低平な沖積平野を流下するので河床勾配は極めて小さくほとんど水面勾配で流下するので河道の疎通能力を人工的に向上させるのは難しい。多数の人工水路を組み込んだ複雑な河道のネット・ワークの非定常流の挙動を解明することは極めて困難であり、仮にこれを computer simulation によることにすれば膨大な計算容量が必要となり、常に dimensionality の問題がつきまとう。そうした水理解析上の難点はともかく、このような複雑に錯綜した河道網において治水対策がいかに困難であるかは容易に想像できよう。

流域についていえば、言葉どおり都市化流域であって、舗装道路、家屋等の不浸透性地表でおおわれ、雨水の保水能力は極端に小さい。このため降雨流出の過程が時間的に短絡され、洪水流出の集中・激化をもたらす。

流域の都市化が流出の変化に及ぼす影響を定量的に解明することが、水文学における最重要課題の一つであったが、多くの研究者の努力によってほぼ満足しうる予測が可能な段階に達したといえる。

流域についてはその物理的特性のみならず、そのうえで展開される生産と生活が都市水害に及ぼす影響について触れないわけにはいかない。

我が国の都市河川流域のすべてについていえることは、決して治水先導型の都市計画に添って都市が発展してきたのではないことである。既成都市周辺の無計画なスプロールの膨張によって被災形態としては極めて劣悪な環境のうえに damage potential だけは異常に蓄積されていった。例によっての後追いの治水事業も通常河川に比べ幾層倍かは困難なのは言をまたず、大都市にあっては今後、治水単独の事業執行はほとんど不可能で、都市再開事業とリンクさせる等の方策を取らざるを得ないだろう。

完全都市化流域といった極限状態の都市河川の治水対策について本文の最終で触れるつもりであ

る。

都市河川の水害の特性は、複合的かつ流動的であり、その評価は「軽災害」の言葉に尽きることとは前述のとおりであるが、こうした災害に対処するための防災機能の特徴について要約しておこう。

通常の河川における治水の要諦は自然、あるいは人工の貯留・調節機能を活用して河道への流出を極力、低減・遅滞させること、及び河道に流達した出水を安全に流下することに尽きる。前者として植林による流域の保水機能の涵養、ダム貯水池による洪水調節等がその代表的なものであり、後者として築堤工法があることは申すまでもない。

都市河川においても、その治水工法の基本は上述のところと全く変わらない。ただ、人口稠密な既成市街地で河道拡幅して築堤することや、まして洪水の貯留調節のために地表に広大な遊水池用地を取得するといったことは現実には不可能であるから、変則的な窮余の策を講ぜざるを得ない。

しかしながら、都市河川固有の治水機能もあって、それは専ら都市河川災害の複合的特性に由来するものである。すなわち、台風来襲時を想定しても高潮災害、洪水災害、内水災害はほぼ同時に生起するものとしなければならない。高潮と洪水については外水の氾濫を防止すればよいので築堤方式（防潮護岸）で対処しうるだろう。しかし、未改修区間に高水位が伝播するのを阻止するため、幹川と枝河川の分岐・合流部には水門を設ける必要がある。更に、防潮護岸が完成しても、河川を横断する鉄軌道や道路の嵩上げは護岸竣工に追従することができず、それらの横断部分・架橋地点では護岸・堤防の切り欠き部が残置される。出水時にこの切り欠き部分を応急的に締め切るため防潮鉄扉が設置されているが、その数は当然、極めて多数に上り大阪市内に例を取れば500を超える防潮鉄扉がある。

高潮防御の固有の工法として防潮水門がある。これは河川の河口部に大型水門を設置して、高潮来襲時にこれを閉じて、高潮あるいは津波の河川遡上を阻止しようとするもので、防潮対策としては抜本的なものである。

しかしながら、津波はともかく、台風高潮の場合は高潮のみならず、台風に伴う豪雨によって高潮とほとんど同時に洪水も起こるはずである。防潮対策のために、河口を防潮水門で閉塞すれば、当然、河道洪水は河道に貯留され、そのまま放置すれば外水がやがて氾濫するであろう。大阪市街の場合は、防潮水門の設置以前に防潮護岸が完成しており、その分、河道断面積が大きくなっており河道貯留容量も大きくなっているとはいえない。このため、市内河川（寝屋川水系）の一地点（毛馬）に超大容量ポンプ場を設け、これによって河道貯留水の一部を他水系（新淀川）に排出して、市内河川の貯留量増加（水位上昇）を軽減する方法を取っている。

このようにみえてくると、都市河川の防災施設の特徴は、それが極めて多種・多数の土工構造物の組合せから成る複雑なシステムから構成され、それらの構成要素が相互に微妙な連係操作によって運営されていることが理解されよう。都市河川以外の通常の河川においてさえ、治水のための統合管理の必要性が強調されるのに、都市河川においては一層の緊急性が強く主張されるべきである。

以上は洪水に対する河道対応であるが、治水施策のはかの一つの柱である出水に対する貯留・調節工法についても都市河川独自の方法がある。河道に沿って（on-stream）設置される貯水池を遊水池、河道と完全に分離したもの（off-stream）を調節池、工事中等の暫定的利用に当たるものを調整池といって専門的には区別するが、いずれにしても有効な調節機能をもたせるためには広大な面積を必要とし、既成市街地にこれを求めることは現実にはほとんど不可能である。最近、建設省が推進しつつある総合治水対策の一つの眼目は治水に対する流域管理であって、流域内で種々の方策を動員して降水の貯留・調節を計ろうとするものである。治水緑地と称する多目的遊水池をはじめ、雨天時の学校の運動場、ビルの flatroof 等一時貯留する各戸貯留まで考えられているし、浸透性舗装の施工によって幾らかでも浸透性地表の造成を心掛けている。

繰り返すようであるが、地表でどのような貯水池を造成するにしろ、広大な用地が必要で大抵の場合、実施不可能であるから、窮余の策として地下貯留が考えられた。公園だとか、道路等、公共用地の地下に貯水池を掘削し、降水を一時貯留して降雨終了後ポンプ排出しようとするもので、千葉県松戸市の公園地下貯留をはじめ既にかんりの施工例がある。

内水災害を起こす湛水も、河川サイドからみれば有効な流域貯留であるに違いないが、それが住居地で野放図に起こるところに災害といわれるゆえんがある。内水災害の軽減・防止は一つにかかって下水道の整備にあることは言をまたない。ただし、広大な集水区をもつ流域下水道の終末処理場では、その排出量は河川固有流量に匹敵する大流量であり、その河道への排出は河川流況を大きく乱し、場合によってはそのために河川が氾濫することもあり得るので、河川の改修と下水道の整備が均衡の取れた型で推進することが必須である。

Ⅲ．都市河川水害の研究課題

以上概説した都市河川の特長、及び防災機能面での特徴を踏まえて、都市水害の研究課題を順を追って列挙すればおよそ次のごとくであろう（ただし、研究方針、研究内容は筆者の研究室で行ったものを紹介しているのであらかじめ御了承願いたい）。

A．都市河川河道網の洪水追跡シミュレーション

単一河道の洪水追跡の数値計算においても、急勾配区間があったり、破堤や遊水池への横溢流があれば、計算不安定を起こすなど、厄介な問題があるのに、都市河川のように極めて複雑な河道網を構成している場合の洪水解析は種々面倒なことが生起する。分合流点といった節点の流体力学的接続条件もさることながら、最大の問題は dimensionality の問題である。

計算安定がほぼ保証されるという理由から数値解析では implicit scheme が多用されるが、多元一次連立方程式をそのまま計算機にかけたので

は、仮にかかっても job time が莫大で経費的に大変である。この場合、band matrix の手法を用いれば計算時間が大幅に（10分の1程度に）削減できるだろうし、もし厳密な非定常解が必要でないならば、適当な境界条件を与えて定常不等流計算でもまずまずの計算精度が得られることを確かめている。

B. 河道主要地点の計画水位の確率評価

都市河川の水害の特徴の一つは複合災害であり、特に高潮現象と洪水現象の重合が重要であることは繰り返し述べたところであるが、現実の都市河川治水計画はそういう意味の複合性をいまだ取り入れていない。例えば、河道水位計算の境界条件である河口水位にしても、大抵の場合、大潮・朔望の満潮面としており、高潮の同時生起は考慮していない。通常、台風高潮時の水位時間曲線には、高潮主体部に前行する前駆部分（fore-runner）と、主体部に続く「われもどし」（resurgence）があって、これらを含めるといわゆる高潮の異常潮位の継続時間はかなり長いから、洪水現象がそれに重なる可能性は大きい。つまり、感潮部河道内では高潮波形と洪水波形の重合を考慮する必要がある、その重なり方はいうまでもなく不確定的である。

一方、洪水規模については既往実績に基づいた順序統計学的解析を行い、最近の治水計画では確率洪水の概念を導入し、最重要河川については200年確率洪水を採用している（200年確率洪水とは、十分長い期間について考えれば、平均して200年に一度起こる程度の洪水をいう）。洪水は毎年1回は生起するから、年最大洪水（annual flood）をサンプルとすれば、観測年の数だけの標本があるから、ほぼ確率評価に耐える。

ところが、高潮は洪水に比べその生起頻度がはるかに小さいのでいまのところ確率評価の対象とはし難く、やむを得ず本質的には既往最大主義によった計画量を採用している。しかし、高潮そのものを確率量とするのではなく、より根源的に洋上に発生する台風を計画量とし、その個数、規模、経路等を確率評価して確率モデル台風を作成し、シミュレーションによって懸案地点の高潮を算出するといった方法がもし可能ならば、高潮も

間接的に確率的取扱いの対象と成り得よう。

こうして、洪水・高潮ともに生起確率が求まれば、その joint probability として計画水位の確率評価は可能であろう。

C. 内水解析

都市河川流域に降下した降雨は、自然状態では排出されず、ほとんどすべてがポンプによる強制排水に依存するから、地表に湛水が起こるかどうかは、あるいはその程度は、下水管渠の集水区への入力としての降雨強度と出力としての下水管渠の疎通能力によって単純に定まる。下水管疎通能力は管径、勾配、上・下流端圧力、粗度係数によって求められる。ところが広域的な流域下水道、公共下水道ともなると下水管渠の net-work は莫大なもので、到底1本、1本について解析することはできない。

ところで、自然河川の河川形態学ではトポロジー・モデルが慣用されて、簡単にいえば、河川最上端・源流の河道を一次河道とし、一次と一次が合流して二次の河道を、（二次と一次の合流ではそのまま二次とするが）二次と二次が合流して三次河道を構成するという ordering を行い、各次数の河道ごとに河道長、集水面積、勾配等が統計則として与えられている（Horton-Strahler の法則）。

下水管の net-work はいうまでもなく完全に人工の所産であるから、自然河川で成立するそのような経験則が当てはまるはずがないと思われた。しかし、念のためそのような整理をしてみると、望外にもかつ見事にその法則が成立することが確認された。Horton-Strahler 則に関する最近の解析的検討によれば、河川の net-work で、分・合流生起の random 性が保証されれば、Horton-Strahler 則は証明されることが分かったので、人工的な下水管 net-work でも公共下水道、流域下水道というようにその規模が大きくなればなるほど、大数の法則に従って分・合流生起の random 性が保証されるはずで、このため Horton 則が成立したであろうことはもちろん、後で気づいたことである。

何はともあれ、一次下水管渠（各家庭ごとの domestic pipe）の本数、管径、勾配を1本、1本

計測するという気が狂いそうな作業から研究担当の学生が解放されたのであった。

このようにして下水管渠の各次数ごとに、つまり流域地点ごとに「湛水量」は仔細に算出されたのであるが、これを用いて湛水面積、湛水深を最終的に求めようとしてはたと作業が停止した。解析対象の河川流域が（他の都市河川についても事情は全く同様であろうが）余りにも平坦であるために、粗い等高線図では氾濫図の作製が全く不可能であり、5cm 刻みといった現実離れた等高線図が必要なことが分かったのである。

あるいはこのことが内水災害の特性の端的な具現かもしれない。すなわち、内水・湛水害はどこで起こるかは予測し難いのである。

D. 河道 net-work の事故の波及

前述したとおり、都市河川の防災施設の構成要素の数は莫大なもので、防潮鉄扉の数だけでも500、ポンプの台数は更に多いだろうから優に1,000 オーダーの要素で構成される複雑極まるシステムである。

こうした多数素子から成るシステムをトータルとしてとられてその安全度を規定以上に保つには各素子の信頼度が天文学的数字でなければならないことは宇宙ロケットに絡んで必ず聞かされる説話である。

河川防災システムにおいても、あらゆる部品の故障がトータルシステムの機能喪失につながるわけではないし、部品ごとに故障の波及範囲、波及強度は異なるであろう。

こうした幅濶したシステム内での事故の伝播過程は、かつて原子力発電所の安全性評価に使用された event tree, あるいは fault tree の手法も有効であろう。

筆者らは、その伝達過程をより定量的に解明するため Dynamic Sensibility Analysis という手法を開発した。

その基本的な発想は次のようであった。

全く同じ河道網モデルを二組用意して、所与の条件の下で洪水を模擬発生させておく。モデルの一つの特定の部品で事故を発生させそのときの洪水挙動を改めてシミュレートする。このモデルの基準地点の流況（水位）から非事故モデルの流況

を差し引けば事故波及強度が求まるはずである。

基本構想を語るのはやさしいが、事故ごとの非定常計算を含み計算量が実施不能なほど、巨大になることは容易に想像できよう。

それで、計算ケースを節減するために、あらかじめ各要素間の linkage の有無についての判別が可能であればおおいに有益である。

ここでは詳細は省略するが、トポロジーで最近開発された ISM (Interpretive Structural Modeling) の手法を用いておおいに実を挙げることができたことを述べるにとどめよう。

E. 段階改修計画

河川改修事業に限らず、大規模プロジェクトは着工から竣工まで長年月を要するのは今日常識である。まして流域住民の利害が密接に絡んでいる都市河川の改修事業は計画段階から多種・多様な折衝調整に時間を費やし、着工後も種々の摩擦で難航する。

当然、長期の計画・工事期間を覚悟せざるを得ず、段階改修の問題が必然的に浮上するのである。

段階改修と一口にいても種々の取上げ方があり得るはずで、筆者はそれを次の三種に分類した。

- (1) 計画論レベル
- (2) 工程レベル
- (3) 工種レベル

計画論レベルとは、具体的には治水の計画対象水文学量、すなわち確率年を何年にするかという問題である。

例えば、現行の我が国河川計画では河川の重要度に応じて、確率年を50年、100年、200年としているが、例えば、安全度の水準を上げる際に、50年から一挙に200年に上げるのが治水経済的に有利なのか、それとも50年、100年、200年と段階的に上げていくのがよいのかといった問題がこれに相当する。

工程レベルとは、河道のどの区間から改修に着手すべきかの優先順位の問題であり、工種レベルとは、指定された改修区間で最も有効な工種（堤防の嵩上げ、浚渫、拡幅、等々）を選択する問題である。

こうした一連の scheduling の問題は 河川改修のみならず、経営戦略等における最も先端的な課題であり、我々の研究室でも鋭意、この研究に取り組みつゝありその成果は後日、改めて発表したい。

Ⅳ. おわりに

河川工学に限らず、すべての土木事業において、つい最近まで、在来型の工学範囲、いうならば物理系手法のみで事が足りていたのに、近來そうした伝統的手法以外の、以前はごく派生的と目されていた多くの側面の問題がむしろ土木事業遂行の成否を扼するようになってきた。

関連住民との対応、広義の環境問題（騒音、振動、汚染等の狭義の環境保全のみならず、生態系への配慮、遺跡への対応、構造物の美醜等々）まで土木技術者が主体的に解決しなければならない問題が山積みしている。

都市河川に関しても事柄は全く同様であって、ここで述べた種々の問題は、まさに在来型、物理系、伝統的河川工学に限られた一側面の記述にすぎない。

筆者が最近、痛切に感ずることは大ざっぱに言って都市域における河川の存在意義を、どうすれば素直に流域住民に理解してもらえらるうかということである。

断定的な言い方を許していただければ、都市住民は災害のない常日ごろは、河なんぞは積極的な意識の対象にしていない。ここでいう河とは、そこで遊び、情感をはぐくまれ、日常の生活と宿命的に結びつけられた河である。

都市河川はまるで万里の長城のようなコンクリートの高い壁（防潮護岸）で囲繞されて河の水面がみえることもまれであり視覚的にも生活圏と

隔離されている。

網の目のような河川網に沿ってそのような防潮堤が構築されれば、市街区はおのずから小ブロックに分割され、今日的な輪中が形成される。古来の輪中が輪中ごとの連帯意識を育て、水害に対する生々しい利害の対立から抗争意識が消し難かったほどではないにしろ、いまの輪中が情報伝達の阻害要因であることは否定し難い。まして交通等の都市機能を著しく損なっていることは事実である。

堤防ではさまれた河道を流れる水は親水意欲をかき立てるには程遠い汚濁水である。

こう並べ立ててみると都市河川に「良いイメージ」をもってもらうことがますます絶望的になる。

「良いイメージ」をもたず、河を雨水排出路という単一機能でしか評価しないところから諸悪が始まると思う。すなわち、排水能力のみしか期待していない「人工構造物」としての都市河川がいったん、その機能を全うしない事態になれば、声を大にしてその非を責めるのは当然の成り行きである。日ごろの邪魔物が仇をなしたという感覚であらう。

巨額の経費を投入して行われる都市河川の治水事業に関して、流域住民の合意が必須であるし、もし万一、水害でも発生すればまずとりあえずは避難しなければならず、そのためには日ごろから近在河川の流況についてなにがしかの知識がなければ避難すべしとの判断ができるはずがない。こうした面からも都市河川についての啓蒙広報の必要性が痛感されるのである。